



高性能 Si_3N_4 基 微纳米复合陶瓷刀具 及其切削加工

吕志杰 著



科学出版社

高性能 Si_3N_4 基微纳米复合陶瓷 刀具及其切削加工

吕志杰 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是作者结合多年来从事 Si_3N_4 基微纳米复合陶瓷刀具技术研究成果撰写而成的。在全面分析国内外陶瓷刀具技术发展趋势的基础上,论述了 Si_3N_4 基陶瓷刀具材料的设计方法。书中着重介绍了 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{TiC}$ 微纳米复合陶瓷刀具的制备方法、物理力学性能、微观结构、高温氧化性能、抗热震性能、加工球磨铸铁和淬硬T10A材料时刀具的切削性能及其磨损机理; $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiC}/\text{TiC}$ 微纳米复合刀具制备、力学性能、微观结构、加工淬硬40CrMoNiA及淬硬T10A材料时刀具的切削性能及磨损机理。

本书可供切削理论和陶瓷切削刀具等领域的技术人员参考,也可作为科研人员、高等工科院校教师的科研参考书及机械工程专业研究生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

高性能 Si_3N_4 基微纳米复合陶瓷刀具及其切削加工 / 吕志杰著.
—北京:科学出版社,2016.9

ISBN 978-7-03-049920-2

I. ①高… II. ①吕… III. ①纳米材料-复合材料-应用-陶瓷刀具-金属切削-加工工艺 IV. ①TG711

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 219237 号

责任编辑:刘 冉 / 责任校对:何艳萍

责任印制:徐晓晨 / 封面设计:北京图阅盛世

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京厚诚则铭印刷科技有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年9月第 一 版 开本:A5(890×1240)

2017年1月第二次印刷 印张:5 3/4

字数:160 000

定价:68.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

国家自然科学基金面上项目(51375281)

前 言

高速切削加工技术在现代工业生产中具有举足轻重的地位,是高效、高精密加工的发展方向,具有广阔的发展前景。刀具是高速切削加工技术中关键的因素之一,刀具材料的性能及刀具寿命已成为制约难加工材料加工效率及加工质量的最主要原因。在机械加工领域,刀具是最活跃的因素之一。关于刀具材料的改进、性能的提高、新型刀具材料的研制多少年来一直没有间断,且越来越受到重视。

切削加工的进步取决于刀具材料的进步。目前陶瓷刀具的研制已建立起融切削学和陶瓷学为一体的、基于切削可靠性的陶瓷刀具材料设计研究理论体系。现代陶瓷刀具材料多为复相陶瓷,根据材料不同的使用环境,以一定的设计理论为基础,采用各种超细的氧化物、碳化物、氮化物和硼化物等为基本组分,并依据不同的增韧补强机理进行微观结构设计,可以制备出具有良好综合性能的复相陶瓷。随着切削加工技术的广泛应用,生产过程中对切削效率、加工精度及材料硬度提出了更高的要求。现代制造领域许多高精密的场合需要使用高强、高硬和高韧性的材料,目前普遍使用的硬质合金刀具和高速钢刀具均不能适应这些难加工材料高效洁净加工的要求。为适应新形势下对切削刀具的要求,陶瓷刀具、涂层刀具等新型刀具相继问世,并且逐渐投入使用。现代复合陶瓷刀具材料以其卓越的力学性能和切削性能,在高速切削领域以及难加工材料方面,具有其他刀具无可比拟的优势。

Si_3N_4 基陶瓷刀具材料具有较 Al_2O_3 基陶瓷刀具材料低的热膨胀系数、高的断裂韧性和抗热震性,但 Si_3N_4 属强共价键化合

物,难以烧结致密。同时纯 Si_3N_4 陶瓷硬度偏低,耐磨性差,故需其他添加物,利用不同的增韧补强机制提高其性能。

本书作者通过添加聚乙二醇(PEG),利用超声分散和机械搅拌相结合的方法制备出分散良好的复合陶瓷粉末。并提出在微米级 Si_3N_4 基体中添加纳米级 Si_3N_4 颗粒和 TiC 颗粒的方法,成功制备出了性能优良的 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{TiC}$ 微纳米复合陶瓷刀具材料及 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiC}/\text{TiC}$ 微纳米复合陶瓷刀具材料。利用 SEM、TEM 等手段观察分析了材料的微观结构组织,研究了复合材料的断裂机理及 SiC 颗粒、TiC 颗粒、 Si_3N_4 类晶须晶粒双峰分布对微纳米复合材料协同补强增韧机理。采用维氏压痕-淬火法研究了材料的抗热震性能,用压痕-强度衰减法研究了材料的 R 曲线,对复合材料进行了高温氧化试验,并分别对两类陶瓷刀具进行了切削性能对比试验。

本书的研究得到国家自然科学基金面上项目(51375281)资助,在此表示衷心的感谢!

由于 Si_3N_4 基微纳米复合陶瓷刀具尚处于不断发展之中,相关理论不断更新,受作者水平所限,书中不妥之处,恳请各位读者提出宝贵意见,谢谢!

吕志杰

于山东建筑大学机电工程学院

2016 年 6 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 国内外陶瓷刀具的研究现状	2
1.1.1 Al_2O_3 基陶瓷刀具	4
1.1.2 Si_3N_4 基陶瓷刀具	5
1.1.3 其他陶瓷刀具	7
1.2 微纳米复合陶瓷刀具材料设计	7
1.2.1 纳米相对复合陶瓷力学性能的影响	8
1.2.2 微纳米陶瓷刀具研究设计	10
1.2.3 微纳米复合陶瓷刀具材料的设计原则	12
1.3 微纳米复合陶瓷材料强韧化模型与强韧化机理	19
1.3.1 强韧化陶瓷材料微观结构设计	19
1.3.2 Si_3N_4 基微纳米复合陶瓷强韧化模型	20
第 2 章 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{TiC}$ 微纳米复合陶瓷刀具制备	25
2.1 微纳米复合陶瓷刀具材料的制备	26
2.1.1 液体介质中纳米颗粒的分散	26
2.1.2 分散稳定影响因素	27
2.1.3 实验过程与结果	29
2.1.4 微纳米复合材料的制备	36
2.2 物理力学性能测试及微观结构表征	41
2.2.1 密度	42
2.2.2 抗弯强度	42
2.2.3 断裂韧性	43

2.2.4	硬度	43
2.2.5	相组成	44
2.2.6	断口及表面形貌分析	44
2.2.7	显微组织结构的透射电镜(TEM)观察	44
2.3	复合材料组分及微纳米复合陶瓷 XRD 分析	45
2.3.1	材料组分	45
2.3.2	微纳米复合陶瓷材料 XRD 图	46
2.4	$\text{Si}_3\text{N}_4/\text{TiC}$ 微纳米复合陶瓷材料力学性能	47
2.4.1	微纳米复合陶瓷材料的致密化	47
2.4.2	微纳米复合陶瓷材料的力学性能	48
2.5	$\text{Si}_3\text{N}_4/\text{TiC}$ 微纳米复合陶瓷材料的微观结构	51
2.5.1	微纳米复合陶瓷材料表面 SEM 分析	51
2.5.2	微观结构分析	54
2.5.3	微纳米复合陶瓷材料断口分析	57
2.5.4	微纳米复合陶瓷材料 TEM 分析	59
2.5.5	微纳米复合陶瓷材料裂纹扩展路径分析	60
第 3 章	$\text{Si}_3\text{N}_4/\text{TiC}$ 微纳米复合陶瓷刀具材料抗热震性能和 R 曲线	63
3.1	陶瓷材料抗热震性能测试方法	64
3.1.1	强度衰减法	64
3.1.2	压痕-淬火法	65
3.2	维氏压痕-淬火法试验	65
3.2.1	试验方法	65
3.2.2	试验结果	66
3.2.3	热震循环试样表面形态观察	68
3.2.4	淬火-残余强度法结果验证	69
3.3	$\text{Si}_3\text{N}_4/\text{TiC}$ 微纳米复合陶瓷材料的 R 曲线	71
3.3.1	理论分析	72
3.3.2	维氏压痕-抗弯强度法可行性分析	73

3.3.3	材料 R 曲线行为	75
3.3.4	材料抗热震性能与断裂韧性的关系	78
3.3.5	材料 R 曲线与抗热震性的内在联系	80
第 4 章	$\text{Si}_3\text{N}_4/\text{TiC}$ 微纳米复合陶瓷刀具材料高温氧化性能	85
4.1	氧化试验	85
4.2	$\text{Si}_3\text{N}_4/\text{TiC}$ 微纳米复合陶瓷刀具材料的氧化性能	86
4.2.1	$\text{Si}_3\text{N}_4/\text{TiC}$ 微纳米复合材料的氧化动力学	86
4.2.2	$\text{Si}_3\text{N}_4/\text{TiC}$ 微纳米复合材料的氧化机理	88
4.2.3	氧化对 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{TiC}$ 微纳米复合陶瓷材料强度 的影响	92
第 5 章	$\text{Si}_3\text{N}_4/\text{TiC}$ 微纳米复合陶瓷刀具切削性能	95
5.1	切削力和切削温度测试原理	95
5.1.1	切削力测试原理	96
5.1.2	切削温度测试原理	97
5.2	mnST28 微纳米复合陶瓷刀具切削球墨铸铁性能	98
5.2.1	试验条件	99
5.2.2	试验结果	99
5.2.3	刀具磨损机理分析	104
5.3	mnST28 微纳米复合陶瓷刀具切削淬硬 T10A 工具 钢性能	106
5.3.1	试验条件	106
5.3.2	试验结果	106
5.3.3	陶瓷刀具的磨损与破损机理分析	109
第 6 章	$\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiC}/\text{TiC}$ 微纳米复合陶瓷刀具材料微观结构 及力学性能	114
6.1	$\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiC}/\text{TiC}$ 微纳米复合陶瓷刀具材料制备	114
6.1.1	纳米颗粒的分散及粉体的制备	114

6.1.2	多相微纳米复合材料的制备	117
6.1.3	微纳米复合陶瓷刀具材料 XRD 分析	118
6.2	微纳米复合陶瓷材料致密性及力学性能	119
6.2.1	微纳米复合陶瓷材料的致密性	119
6.2.2	微纳米复合陶瓷材料的力学性能	120
6.3	微纳米复合陶瓷材料的显微结构	123
6.3.1	微纳米复合陶瓷材料 SEM 和 TEM 分析	123
6.3.2	微纳米复合陶瓷材料显微结构分析	126
6.3.3	微纳米复合陶瓷材料断口分析	129
第 7 章	$\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiC}/\text{TiC}$ 微纳米复合陶瓷刀具切削性能及 磨损机理	132
7.1	实验条件	133
7.2	切削用量的选择	134
7.3	连续切削淬硬 40CrNiMoA 棒料	135
7.3.1	连续切削淬硬 40CrNiMoA 棒料时刀具的 切削性能	136
7.3.2	刀具材料切削 40CrNiMoA 的磨损破损形态 与机理分析	138
7.3.3	陶瓷刀具切削 40CrNiMoA 工件后的 EDS 分析	146
7.4	连续切削淬硬 T10A 棒料	150
7.4.1	连续切削淬硬 T10A 棒料时刀具的切削 性能	150
7.4.2	刀具切削 T10A 的磨损破损形态与机理 分析	152
参考文献		161

第1章 绪 论

纳米技术是 20 世纪 80 年代末崛起的新科技,至今纳米技术和纳米材料,正逐步渗透新材料、微电子机械、计算机、医学、航空航天、环境、能源、生物技术和农业等诸多领域,促使其产生了革命性的变化。纳米科技研究尺度在 $0.1\sim 100\text{ nm}$ 之间,尺寸接近微观领域电子、原子和分子的尺寸,由此纳米材料表现出了许多特殊的性质。微米材料是指尺寸处于微米量级和亚微米量级的材料(亚微米量级 $0.1\sim 1.0\text{ }\mu\text{m}$,微米量级 $>1.0\text{ }\mu\text{m}$)。微纳米复合材料就是在微米的结构中包含纳米结构的复合型材料。微纳米复合材料兼具微米材料和纳米材料的结构特点,尺寸梯度使其具有独特的性能。

切削加工是机械制造行业中占主导地位的加工方法,占整体切削加工量的 90%左右^[1,2]。进入 21 世纪,随着制造技术向高效率、高精度、高柔性和强化环境意识的方向发展,机械加工中的辅助工时大大缩短,提高切削加工效率已成为加速产品开发、降低成本、争取市场的关键所在。在这种情况下,高速切削发展成为先进制造技术的最重要的共性技术之一,并以其较高的材料切除率、加工精度和表面质量被公认为现代制造技术的一大突破。高速切削技术的发展主要取决于高速切削刀具和高速切削机床的进步,其中,高速切削刀具材料起决定性作用。随着航空航天工业、动力工业、国防工业、模具制造业等的发展,黑色金属及难加工材料(包括高硬度钢、铸铁及其合金、模具钢、耐热合金、钛合金等)的高速切削加工技术和刀具材料研究越来越迫切。

陶瓷材料作为三大固体材料之一,具有耐高温、耐腐蚀、抗氧化、高硬度、高强度、低蠕变速率、低密度以及介电、压电、

光学、电磁性等等优异性能,在冶金、化工、机械、电子、航空航天、能源等领域,已成为各种结构、信息和功能材料的主要来源。随着烧结理论的深入研究,各种氧化物、碳化物及氮化物等粉末制备技术的不断改进,多种陶瓷烧结及加工设备和工艺的不断开发研制,使得陶瓷材料成为切削刀具的理想材料,几乎可以加工包括多种难加工材料在内的所有黑色和有色金属^[3-6]。但陶瓷材料本征脆性,大多抗拉强度低、韧性差,因此陶瓷材料的强韧化是拓展其应用的关键。

陶瓷材料的复合化是提高其性能最常用的手段,而纳米复合是提高材料力学性能的有效手段之一。陶瓷复合材料由于各组分之间的取长补短、协同作用,弥补了单相材料的缺点,产生了单相材料所不具备的优异性能。陶瓷复合材料的出现和发展,是现代科学技术不断进步的结果,也是陶瓷材料设计方面的一个突破,它综合了各种材料的优点,按需设计、复合成为综合性能优异的新型陶瓷材料^[7],而纳米复合陶瓷是比较有前途的复合材料之一。英国著名材料专家 R. W. Cahn 在《自然》杂志上撰文说^[8]:“纳米陶瓷是解决陶瓷脆性的战略途径。” K. Niihara 教授等采用热压烧结、无压烧结、热等静压烧结等烧结技术制备的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiC}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}_3\text{N}_4$ 、 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiC}$ 等纳米复合陶瓷材料^[9-12],其力学性能都得到了较大提高。微纳米复合陶瓷刀具材料可以包括:纤维(或晶须)补强陶瓷复合材料;第二相弥散的复相陶瓷;两(多)相组成的复相陶瓷;还可以有陶瓷/金属复合材料等。微纳米复合陶瓷可以通过对组成和它的显微结构的设计来定性地预测和改进它的性能,使得复合陶瓷刀具材料在性能上明显地表现出它的优越性。

1.1 国内外陶瓷刀具的研究现状

高速切削加工技术在现代工业生产中具有举足轻重的地位,是高效、高精密加工的发展方向,具有广阔的发展前景^[13]。刀

具是高速切削加工技术中关键的因素之一,刀具材料的性能及刀具寿命已成为制约难加工材料加工效率及加工质量的最主要原因。在机械加工领域中,刀具是最活跃的因素^[1, 2, 14]。关于刀具材料的改进、性能的提高、新型刀具材料的研制多少年来一直没有间断,且越来越受到重视^[2, 15]。

切削加工的进步取决于刀具材料的进步。目前陶瓷刀具的研制已建立起融切削学和陶瓷学为一体的、基于切削可靠性的陶瓷刀具材料设计研究理论体系。现代陶瓷刀具材料多为复相陶瓷,根据材料不同的使用环境,以一定的设计理论为基础,采用各种超细的氧化物、碳化物、氮化物和硼化物等为基本组分,并依据不同的增韧补强机理进行微观结构设计,可以制备出具有良好综合性能的复相陶瓷。陶瓷刀具材料的主要优点是化学稳定性好,与金属的亲合力小,扩散磨损小,与所加工材料的摩擦系数较低,从而减少了切削力和切削热,而且不易产生积屑瘤,硬度和耐磨性能高,高温性能好,因此得到了广泛的应用。主要分为氧化铝基和氮化硅基两大体系,其中增强相主要有:TiC、TiN、TiB₂、SiC_p、SiC_w、(W,Ti)C、Ti(CN)、WC、Mo₂C、ZrO₂、B₄C、ZrB₂、Ti(BN)等。

随着切削加工技术的广泛应用,生产过程中对切削效率、加工精度及材料硬度提出了更高的要求。现代制造领域许多高精密的场合需要使用高强、高硬和高韧性的材料,目前普遍使用的硬质合金刀具和高速钢刀具均不能适应这些难加工材料高效洁净加工的要求。为适应新形势下对切削刀具的要求,陶瓷刀具、涂层刀具等新型刀具材料相继问世,并且逐渐投入使用。现代复合陶瓷刀具材料以其卓越的力学性能和切削性能,在高速切削领域以及难加工材料方面,具有其他刀具无可比拟的优势,势必将会引领切削加工领域的又一次飞跃^[13, 16, 17]。

目前,国内研究陶瓷刀具已与国际先进水平相当,甚至有些复合陶瓷刀具已达到世界领先水平,如梯度功能陶瓷刀片、纳米金属陶瓷刀片等。在实际应用领域,国内的许多行业如机械生产、

船舶加工、飞机制造等都开始利用陶瓷刀具处理难切削材料^[18]。大众汽车已全部采用高性能陶瓷刀具加工高硬轴承座,大幅提高了工作效率。

复合陶瓷刀具材料在设计和制备时,可根据具体要求,利用相应的强韧化机理和交叉设计理论,建立强韧化模型,并合理选择组分和制备工艺,使刀具材料综合性能得到较大的改善^[19,20]。

目前国内前沿加工领域采用的陶瓷刀具材料多为氧化铝系和氮化硅系以及金属陶瓷系列和塞隆(Sialon)系列。

1.1.1 Al_2O_3 基陶瓷刀具

以氧化铝(Al_2O_3)为主体的陶瓷材料,其中包括纯氧化铝陶瓷,氧化铝中添加各种碳化物(TiC , WC , SiC , TaC)、氧化物(ZrO_2)、氮化物(TiN , AlN)及硼化物(TiB_2)等的复合陶瓷,以及在氧化铝中同时添加化合物与黏结金属(Mo , Ni , Co , W , Cr)的复合陶瓷等。复合陶瓷的硬度、强度、耐磨性以及高温性能均优于纯 Al_2O_3 , 是用来切削高强度钢、淬硬钢以及断续切削的优异刀具材料。氧化铝系陶瓷刀具材料是目前所有陶瓷刀具中应用最广泛、年消耗量最大的陶瓷刀具材料。由于 Al_2O_3 系陶瓷刀具化学稳定性好、耐热、耐磨性能优异且价格低廉,所以目前所占比例很大。国外开发的 Al_2O_3 系陶瓷刀具材料已形成商品化的牌号达 50 多种^[21,22]。主要牌号有: SN 系列和 NTK 系列。其主要成分为: $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ (或 WC 或 SiC 或 TiB_2), $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}+\text{WC}$, $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ (或 WC)+ Co , $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{WC}+\text{TiN}$ 和 Al_2O_3 +合金元素等; 其主要性能指标为: 平均晶粒尺寸大约为 $1\sim3\ \mu\text{m}$, 密度为 $3.8\sim4.5\ \text{g/cm}^3$ 左右, 硬度为 $\text{HRA } 92.5\sim94.5$, 抗弯强度 σ_b 为 $400\sim950\ \text{MPa}$, 断裂韧性 K_{IC} 为 $3.5\sim4.5\ \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, 其中以日本、美国、英国、俄罗斯和德国的陶瓷刀具发展较快。

近 30 年来,国内的陶瓷刀具材料也得到了迅速的发展,已形成商品的牌号就达 20 种左右,主要牌号有: LT35、LT55、SG-3、

SG-4、SG-5、JX-1、JX-2、LP、LD、FG、FH、FTC、AT6、AG2、G5M 和 TRMM 系列^[23-25]，其主要成分为： $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ （或 WC）， $\text{Al}_2\text{O}_3+(\text{W}, \text{Ti})\text{C}+\text{金属}(\text{Co}, \text{Ni})$ ， $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{SiC}+\text{SiC}_w$ 等。其主要性能指标为：平均晶粒尺寸多数小于 $1.5\text{ }\mu\text{m}$ ，密度为 $3.4\sim 3.8\text{ g/cm}^3$ ，硬度为 HRA 91~95，抗弯强度为 $500\sim 1150\text{ MPa}$ ，断裂韧性 K_{IC} 为 $3.5\sim 9.0\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。

Al_2O_3 基陶瓷刀具材料硬度高，耐磨性好，抗热震性高；抗氧化、抗黏结性及化学惰性都很好；抗压、抗弯强度随温度变化不大，高温切削性能优良^[26, 27]。

目前应用较多的 Al_2O_3 基复合陶瓷刀具主要包括：

1) 氧化铝-金属系复合陶瓷刀具：为提高其强度和韧性，在基体材料中引入不大于 10% 的铬、钴、钼、钨、钛、铁及其他金属元素，热压烧结成氧化铝-金属陶瓷刀具。

2) 氧化铝-碳化物系复合陶瓷刀具：为调高其耐磨性和自润滑性，将少量稀土碳化物，如碳化钼、碳化钨、碳化钛、碳化钽、碳化铌和二碳化三铬等加入到氧化铝陶瓷基体材料中，并采用钼、镍（或钴，钨）等金属作为增强相热压烧结而成^[28]。

3) 氧化铝-氮化物、硼化物金属复合陶瓷刀具：该陶瓷刀具材料基本性能与氧化铝-碳化物金属陶瓷材料相似，但添加物改为氮化物、硼化物，如氧化铝/氮化钛、氧化铝/碳氮化钛、氧化铝/硼化钛，使该型刀具材料具有更优的抗热震性^[29]。

1.1.2 Si_3N_4 基陶瓷刀具

Si_3N_4 陶瓷是一种非氧化物工程陶瓷，主要性能指标为：密度 $3.2\sim 3.6\text{ g/cm}^3$ ，硬度 HRA 92~94、抗弯强度 $500\sim 1200\text{ MPa}$ 、断裂韧性 $4.3\sim 8.1\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。 Si_3N_4 陶瓷刀具高温性能优良，在 $1300\sim 1400^\circ\text{C}$ 的高温下切削仍能保持较高的硬度，化学稳定性高，与碳和金属元素之间的摩擦系数较低。 Si_3N_4 陶瓷刀具适于切削铸铁、高温合金和镍基合金等难加工材料，尤其是大进给量

或断续切削^[30]。

国外的 Si_3N_4 基陶瓷材料发展较快,其中以日本和美国发展最快,形成的牌号比较齐全^[31-34],共达 30 多种,主要的牌号有:Kyon2000、Kyon3000、Quantum5000、Sialox2001、SL100、SL200、SX8、FX920、CC680 和 CC690 等。其主要成分为: $\text{Si}_3\text{N}_4+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Y}_2\text{O}_3+\text{ZrO}_2$, $\text{Si}_3\text{N}_4+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$, $\text{Si}_3\text{N}_4+\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{Si}_3\text{N}_4+\text{Y}_2\text{O}_3$ 等。主要性能指标:密度为 $3.2\sim 3.6\text{ g/cm}^3$,硬度为 HRA 92~94,抗弯强度为 $500\sim 1200\text{ MPa}$,断裂韧性 K_{IC} 为 $4.3\sim 8.1\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。

在国内 20 世纪 80 年代初就研制成功了这类陶瓷刀具材料,主要牌号有^[24]:ST4、TP4、SC3、SM、HS78、FT80 和 F85 等。其主要成分为: $\text{Si}_3\text{N}_4+\text{Al}_2\text{O}_3$, Si_3N_4 , $\text{Si}_3\text{N}_4+\text{TiC}+\text{Co}$ 等;其主要性能为:平均晶粒尺寸为 $2\sim 3\text{ }\mu\text{m}$,密度为 $3.18\sim 3.41\text{ g/cm}^3$,硬度为 HRA 91~94,抗弯强度为 $600\sim 850\text{ MPa}$,断裂韧性为 $4.7\sim 7.2\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。同国外的 Si_3N_4 系陶瓷刀具相比,性能差不多,但国内的牌号远比国外少得多。 Si_3N_4 系陶瓷刀具适用于加工铸铁类材料,加工范围比较窄,刀具品种尚不如氧化铝系陶瓷刀具丰富。

纯 Si_3N_4 陶瓷刀具在实际应用中磨损很快,所以目前应用的都是经过增韧补强的高性能复合 Si_3N_4 陶瓷刀具,例如山特维克可乐满生产的 CC620、日本京瓷公司的 KS6000 牌号 Si_3N_4 陶瓷刀具^[35]。

复合 Si_3N_4 陶瓷按增韧补强机理主要包括以下几类:

(1) 纯 Si_3N_4 陶瓷刀具

Si_3N_4 晶粒一般呈长柱状,晶间结合方式为共价键结合。以氧化锰为添加剂采用热压方式制备的纯 Si_3N_4 陶瓷刀具耐热性可达 $1300\sim 1400^\circ\text{C}$,且硬度、强度、断裂韧性和抗氧化性较高,但热膨胀系数较低。该类刀具材料有较好的抗冲击性,尤其是抗热冲击较好,使得刀具材料在高速切削时的使用寿命大大增长。

(2) 复合 Si_3N_4 陶瓷刀具

与纯 Si_3N_4 陶瓷刀具相比,复合氮化硅陶瓷刀具具有更高的化学稳定性、抗蠕变能力和抗疲劳性。该型刀具材料一般采用大

进给量和高速切削铸铁和高温合金^[36, 37]。为改善纯 Si_3N_4 陶瓷刀具的抗疲劳性, 在基体中加入碳化钛, 碳氮化钛-氮化钛作为第二增强相, 刀具材料的硬度提高很多, 但强度和断裂韧性都保持着较高的水平, 如清华紫光的 FD03、重庆特高的 LT-2、艾斯特的 CNGA120404 等^[38]。

1.1.3 其他陶瓷刀具

Sialon ($\text{Si}_3\text{N}_4\text{-Al}_2\text{O}_3$) 陶瓷刀具是由 Si_3N_4 和 Al_2O_3 混合制备而成, 其加工速度可以高达硬质合金的 5~10 倍, 并具有最佳的化学稳定性。目前优良的 Sialon 陶瓷刀具的材料成分为 α/β -Sialon, 通过改变陶瓷材料微观组织、改善制备工艺, 提高了 Sialon 陶瓷刀具材料的物理力学性能, 其他性能如抗疲劳性、抗高温氧化性仍然保持得很好^[39]。如美国肯纳的 KY3500, 美国 Greeleaf 公司的 Grem4B, 日本京瓷 KS6000 等牌号。

山特维克可乐满生产了两种赛隆(Sialon)陶瓷产品, 牌号分别为 CC6060 和 CC6065。这两种陶瓷刀具能有效地应对难加工材料的各种工况的切削加工, 大幅提高生产效率, 例如耐热的超级合金(燃气轮机和航空零件等)。

1.2 微纳米复合陶瓷刀具材料设计

陶瓷材料虽然性能优异, 但其本征脆性影响了它的安全可靠, 成为其应用的主要障碍。陶瓷材料的复合化是提高其性能最常用的手段, 而微纳米复合是提高材料力学性能的有效手段之一。复合陶瓷可以通过对组成和它的显微结构的设计来定性预测和改进它的性能, 使得复合陶瓷刀具材料在性能上明显地表现出其优越性。研究表明^[40-42]: 陶瓷基体中加入纳米分散相进行复合, 材料的强度、韧性及高温性能得到很大的改善。微米和纳米